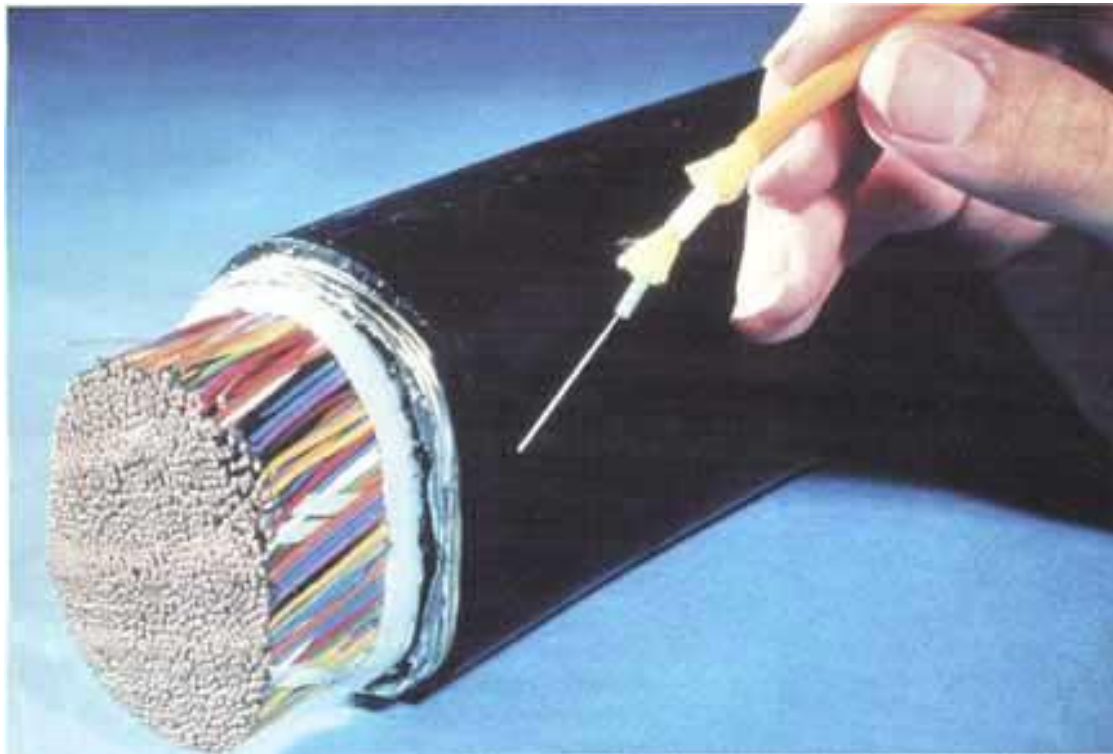


# Sistemas de Transmisión Cableados

## T4 – Cables de FO



# Optica Electromagnética

- La radiación electromagnética se propaga en forma de dos ondas acopladas: campo eléctrico y campo magnético. Ambos son funciones del espacio y el tiempo
- En el espacio libre estas ondas cumplen las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

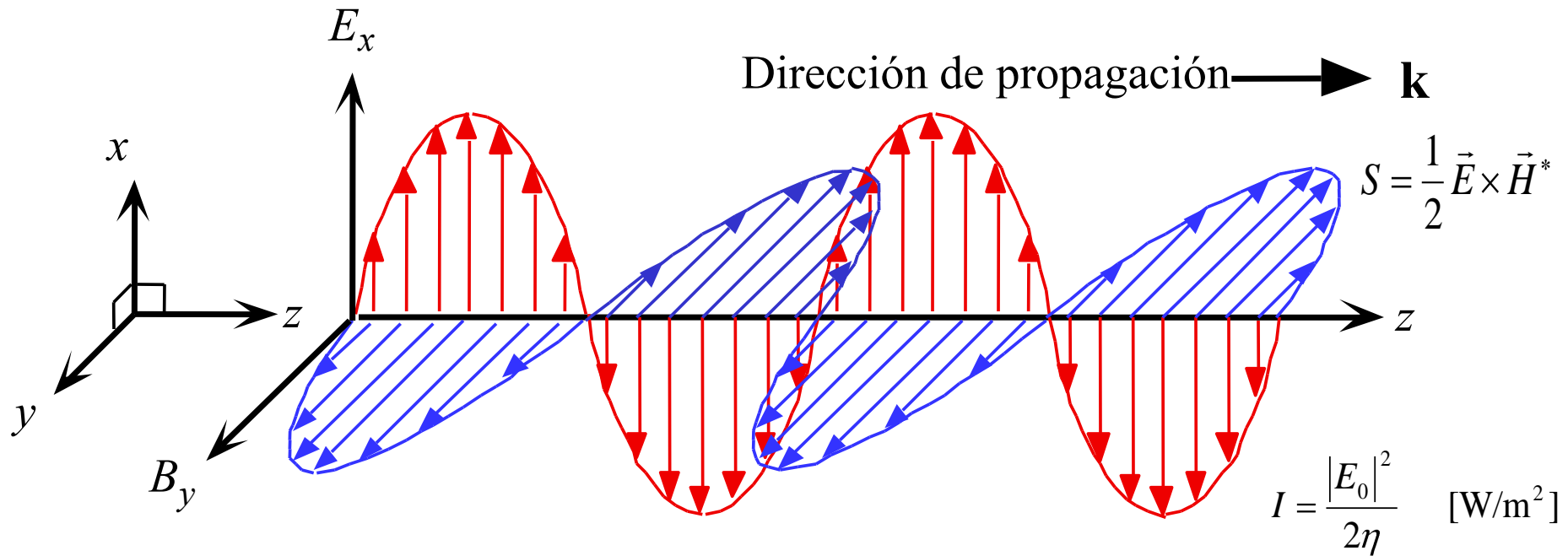
$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

$\varepsilon$  [F/m] : Permitividad Electrica

$\mu$  [H/m] : Permeabilidad Magnetica

# Ondas electromagnéticas en el espacio libre



► Longitud de onda es la distancia a través de la cual la fase cambia en  $2\pi$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

► En el vacío  $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ [F/m]}$

$$\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

$$v = c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\eta_0 = 120\pi \text{ } [\Omega]$$

# Ondas EM en materiales

- La propagación en un material se caracteriza por el índice de refracción

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\text{Velocidad de la luz (onda EM) en el vacío}}{\text{Velocidad de la luz (onda EM) en el medio}} = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_0\epsilon_0}} = \sqrt{\mu_r\epsilon_r}$$

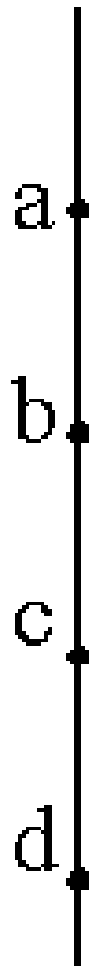
$\mu_r$  : Permeabilidad magnética relativa

$\epsilon_r$  : Permitividad eléctrica relativa

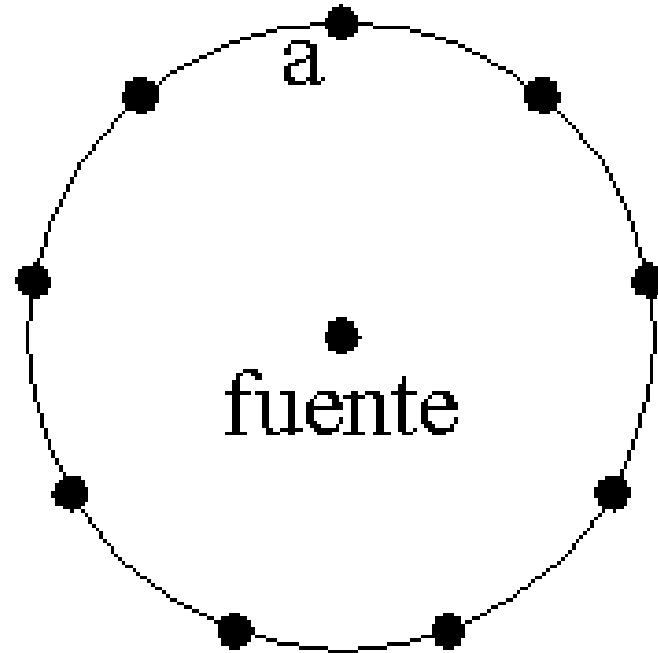
- En un medio no magnético ( $\mu_r = 1$ )

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

# Ondas EM & Óptica de Rayos



frente plano

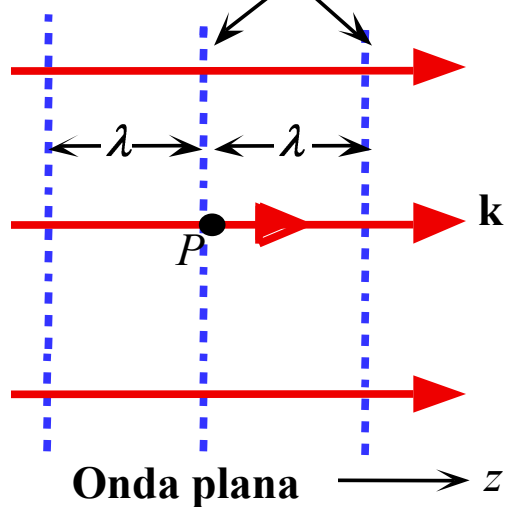


frente fuente puntual

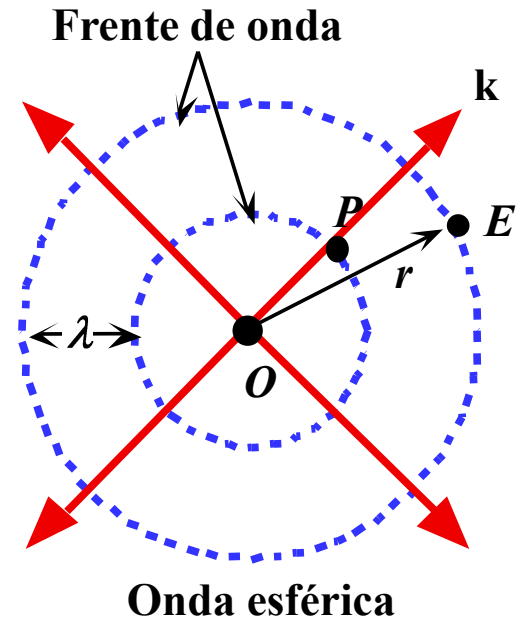
# Ondas EM & Óptica de Rayos

En la óptica física la luz es un frente de onda electromagnético. La luz irradiada desde un punto propaga su energía conformando con todos los puntos de igual fase un frente de onda esférico que aumenta su superficie a medida que avanza.

**Frente de onda**  
(superficies de igual fase)



Lejos de la fuente la superficie del frente de onda tiende a ser plana. En este caso, la luz se representa por un rayo perpendicular al frente de igual fase y paralelo al vector de Poynting que indica el flujo de energía.

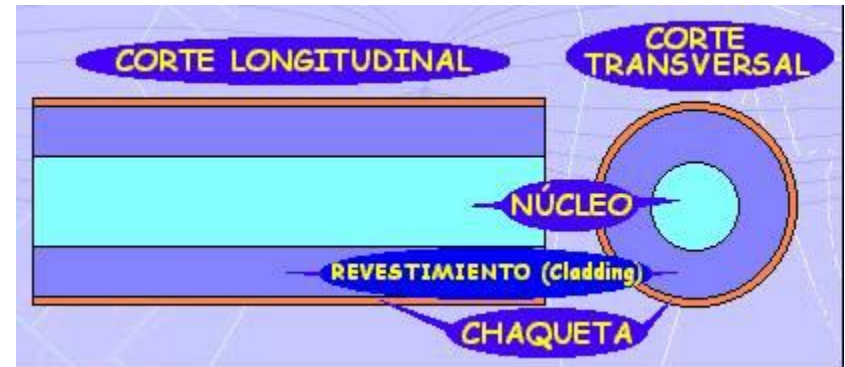


**Óptica de rayos o geométrica:** Los efectos ópticos de gran escala tales como la reflexión y la refracción pueden ser analizados por medio del trazado de rayos.

# FO: PARTES CONSTITUTIVAS

## ◆ NUCLEO

- DIELECTRICO  $n_1$
- ZONA DE GUIADO



## ◆ REVESTIMIENTO

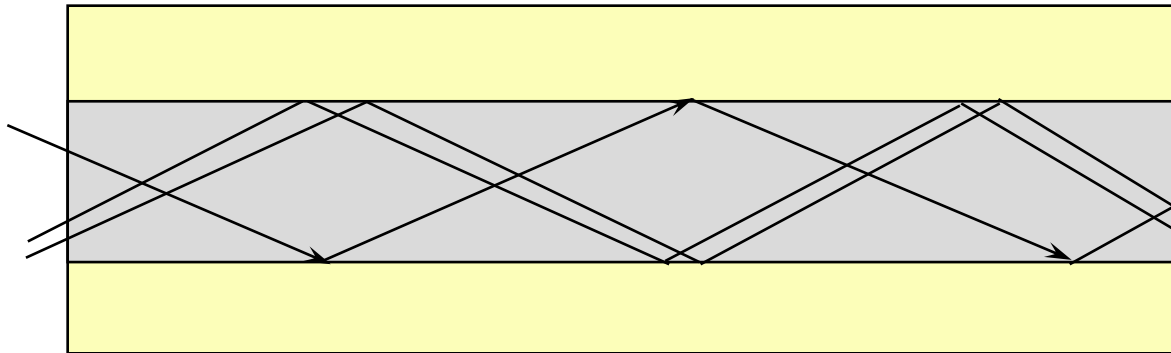
- DIELECTRICO  $n_2$ ,  $n_2 < n_1$
- REDUCE PERDIDAS
- CONSISTENCIA MECANICA

## ◆ REVESTIMIENTO

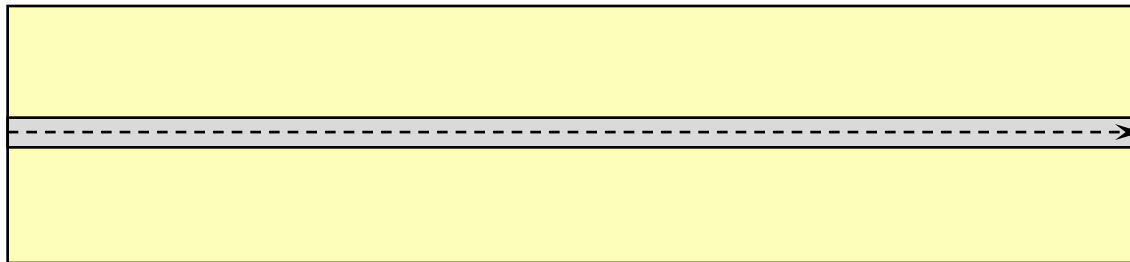
- PLASTICO RESISTENTE A LA ABRASION
- CONSISTENCIA MECANICA

# Modos de propagación

- ▶ Cada haz de luz que ingrese en la fibra con distinto ángulo puede propagarse siempre que cumpla con las ecuaciones de Maxwell.
- ▶ El cumplimiento es discreto, y cada solución se denomina modo de propagación.



Multimodo

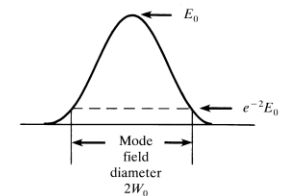
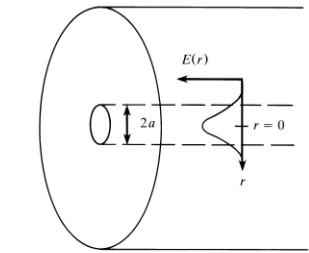
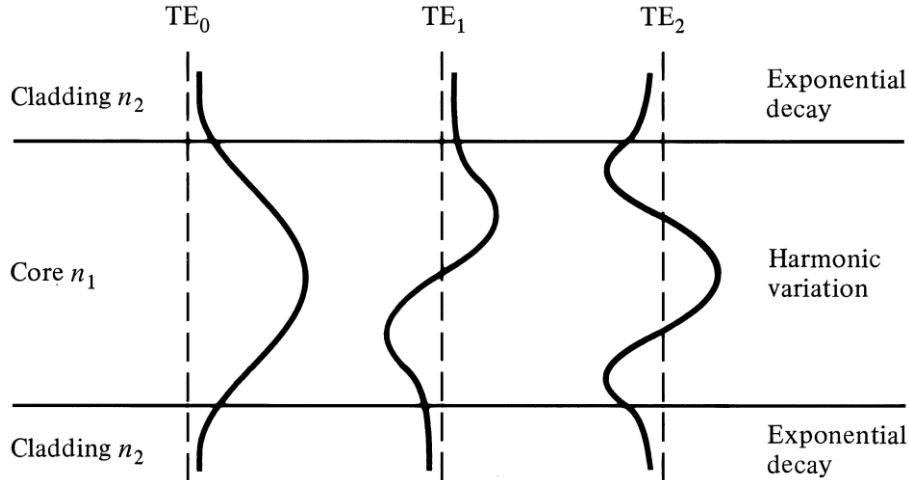


Monomodo



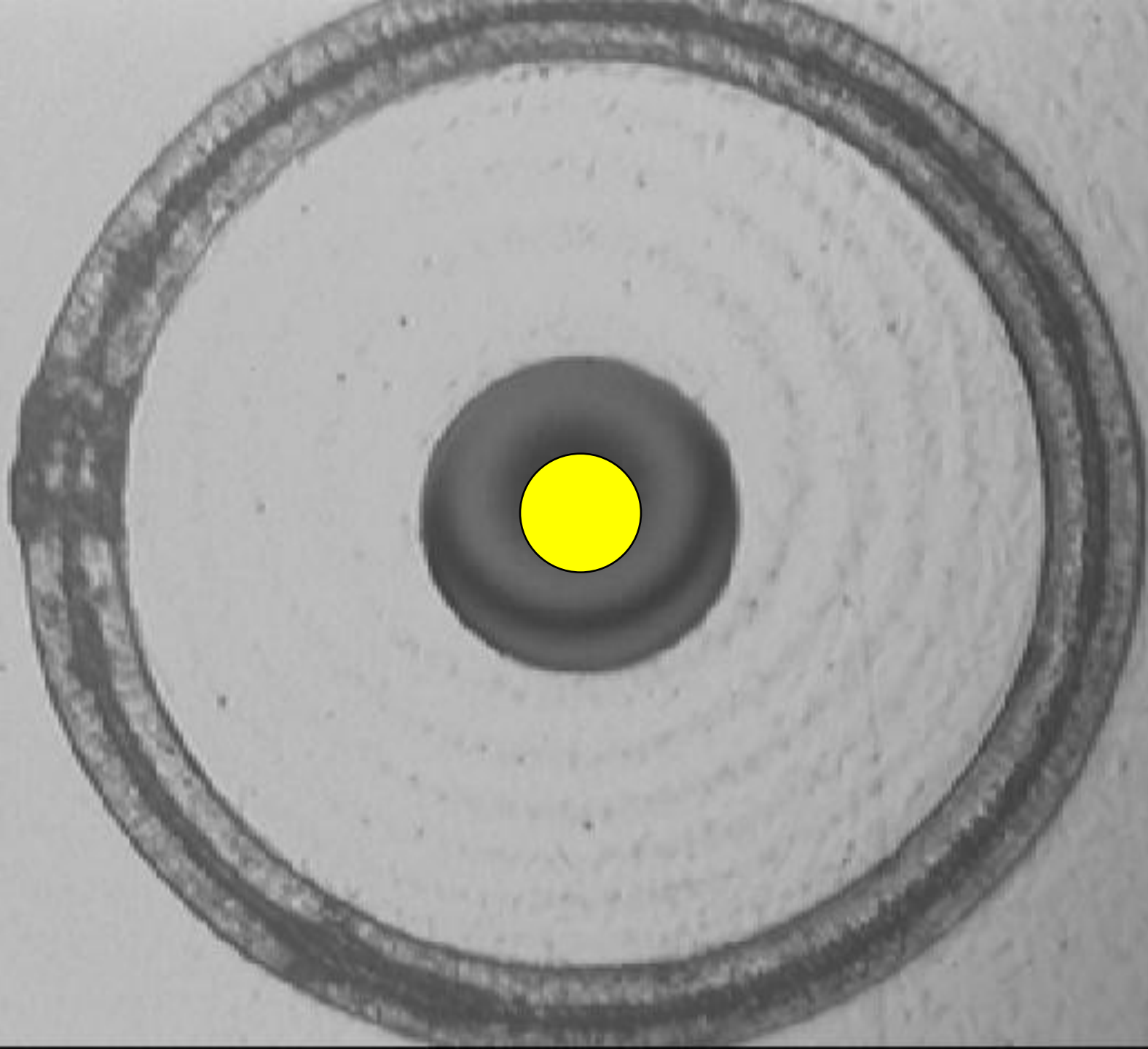
# Modos de propagación

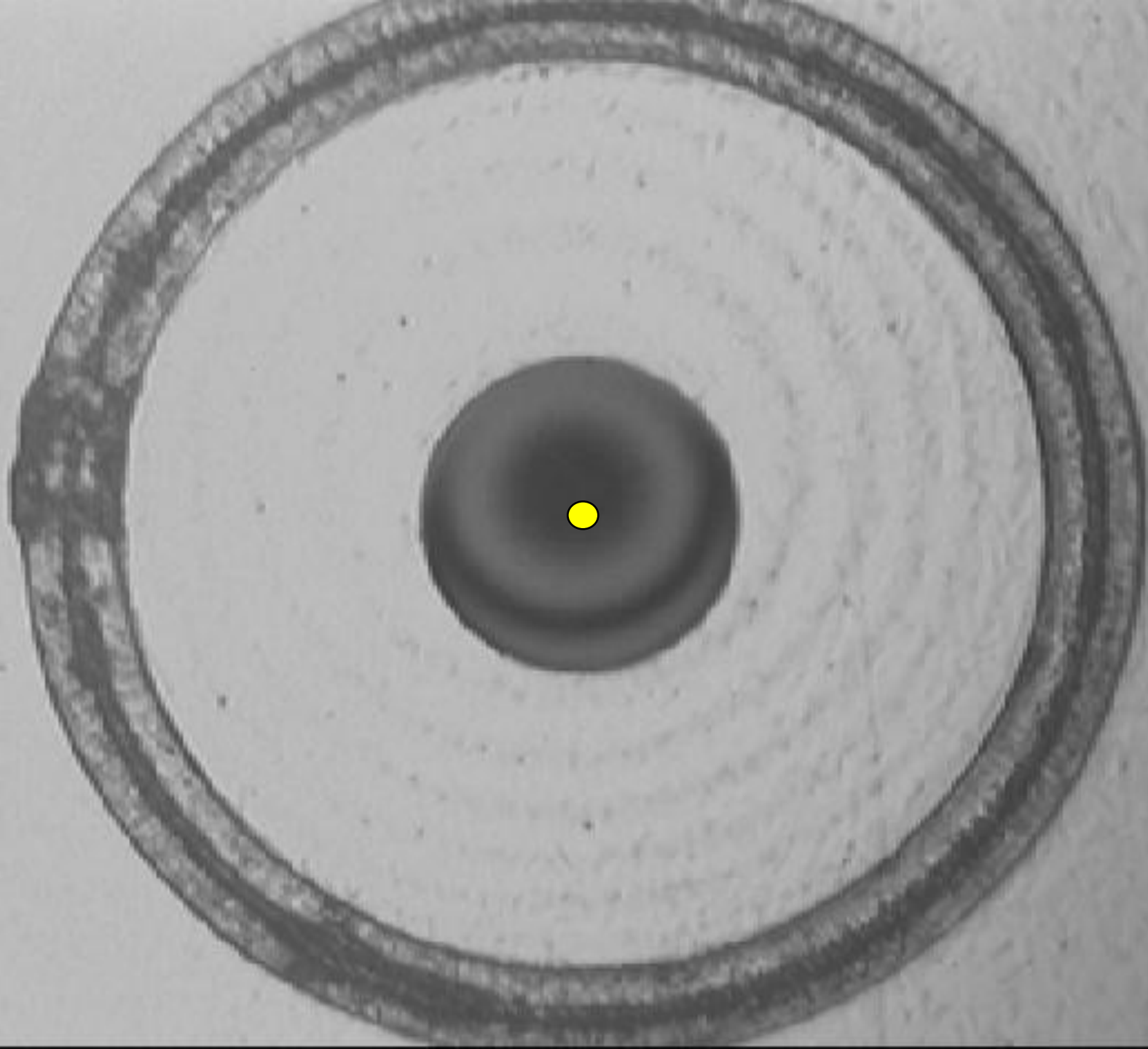
- Un modo puede ser pensado como un patrón de ondulaciones fijas que se forman en la sección transversal de la fibra.
- Si hay varios medios ciclos de tales ondulaciones, continuos a lo largo del diámetro del núcleo de la fibra, la fibra está operando como una fibra multimodo.
- Si hay sólo un medio ciclo, está operando como monomodo.



$$\vec{E}_m(x, y, z, t) = e_x f_m(y) \cos(\omega t - \beta_m z)$$

$$m = 0, 1, 2, 3 \text{ (mode number)}$$





# Parámetros de la FO

## Parámetros Estáticos

- Ópticos
  - Apertura Numérica
  - Perfil del índice de refracción
- Geométricos
  - Diámetro del núcleo
  - Diámetro del revestimiento
  - Excentricidad
  - No circularidad del núcleo
  - No circularidad del revestimiento

## Pérdidas

- Absorción del material
- Difusión
  - Rayleigh
  - Guiado
  - Raman y Brillouin

## Dispersión

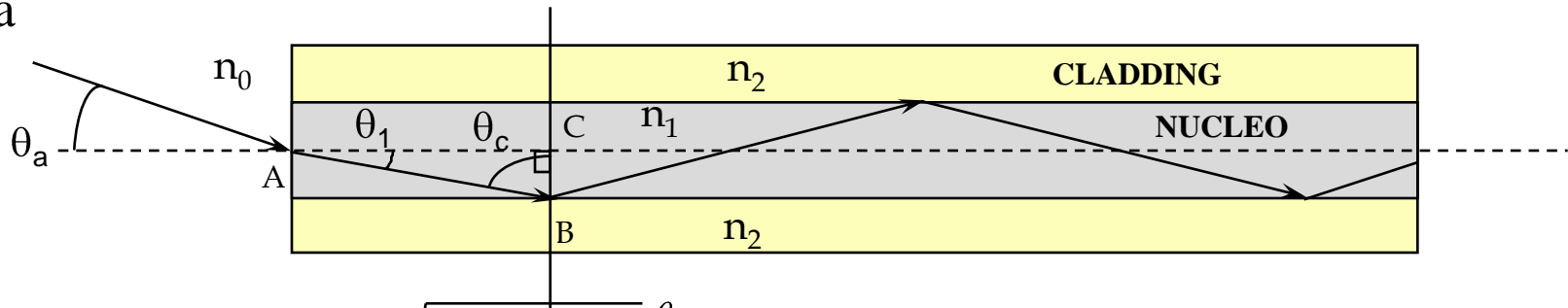
- Intermodal
- Cromática (Monomodo)
  - Dispersión del material
  - Dispersión de Guía de onda
- PMD

## Efectos no lineales

- Dispersión estimulada
- FWM
- SPM
- XPM

# Apertura Numérica

Es el ángulo máximo de entrada del haz de luz que produce reflexión total dentro de la fibra



$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_1 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \theta_a$$

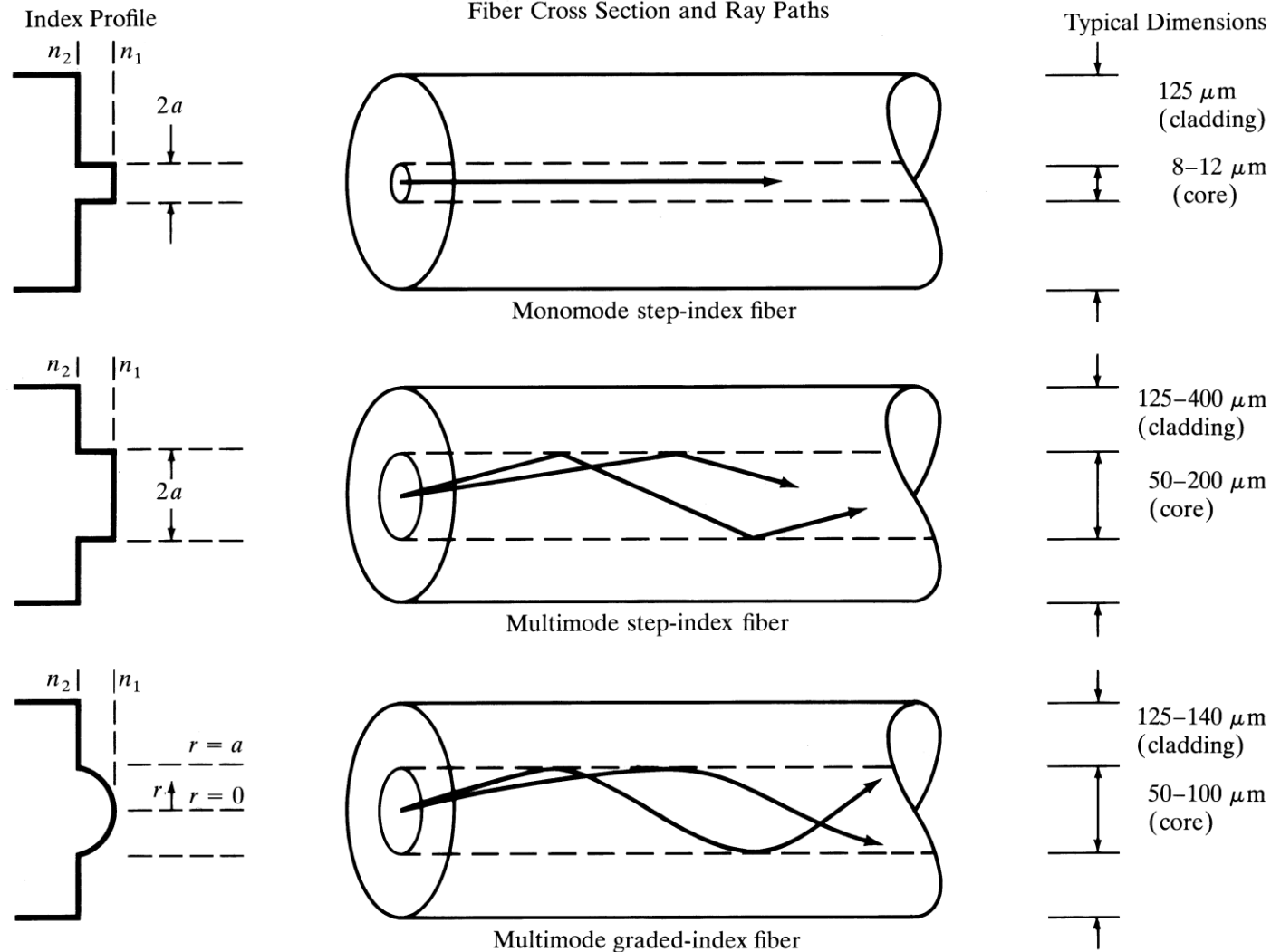
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$NA = \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

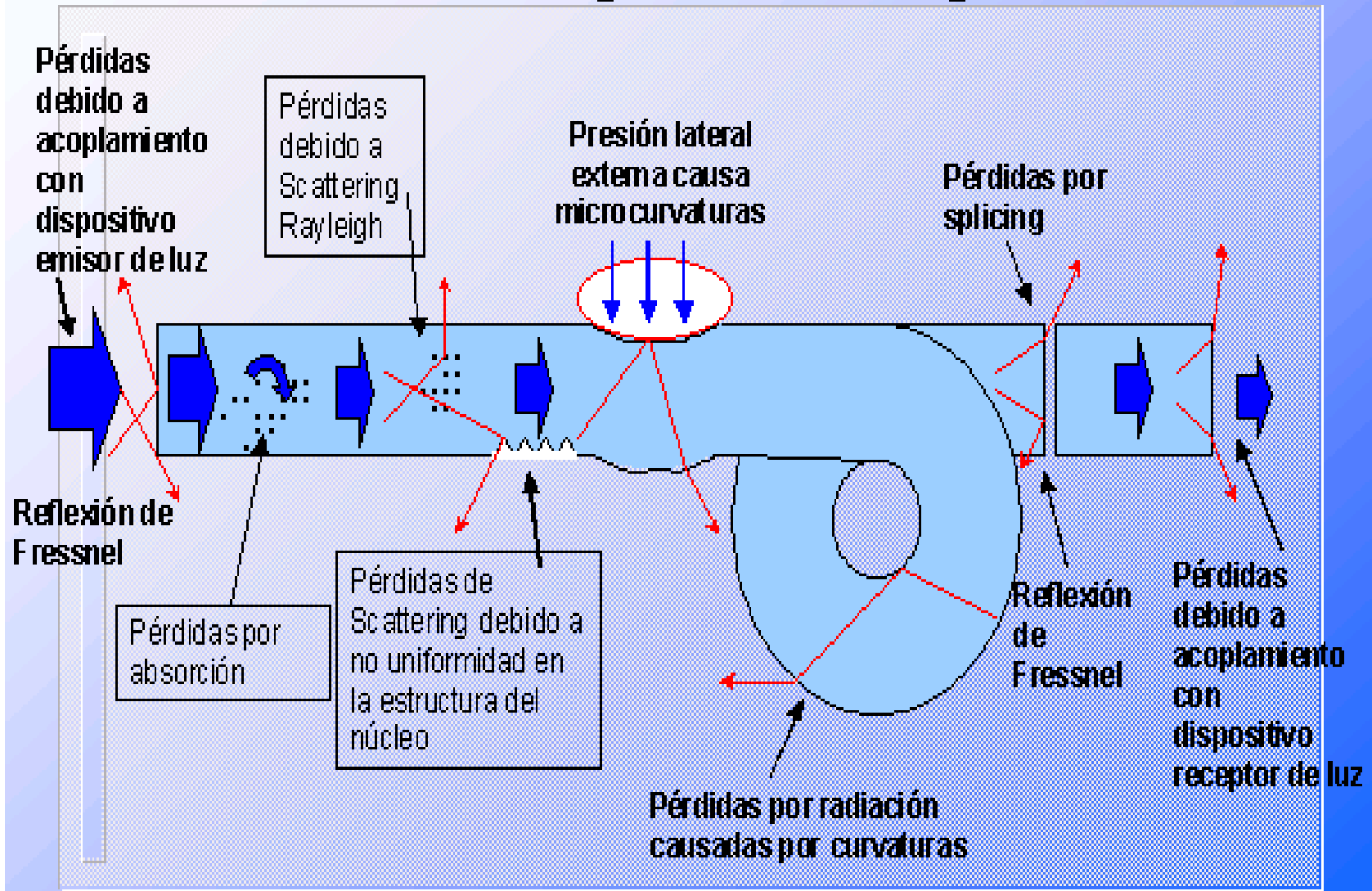
Depende de los índices de refracción de la fibra

La fibra óptica solo conducirá los rayos que estén dentro del cono de aceptación determinado por el ángulo correspondiente a NA.

# Perfiles de indice de refracción



# Causas de pérdidas ópticas



# Absorción

Intrínseca (cada material absorbe ciertas  $\lambda$ s)

UV: resonancia del silicio  $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$

IR: vibraciones moleculares

Extrínseca (impurezas: dependen del proceso de fabricación)

Metales de transición (Cu, Fe, Cr)

Iones  $\text{OH}^-$  (1.39, 1.24 Y  $0.95 \mu\text{m}$ . Vapor de agua en el silicio)

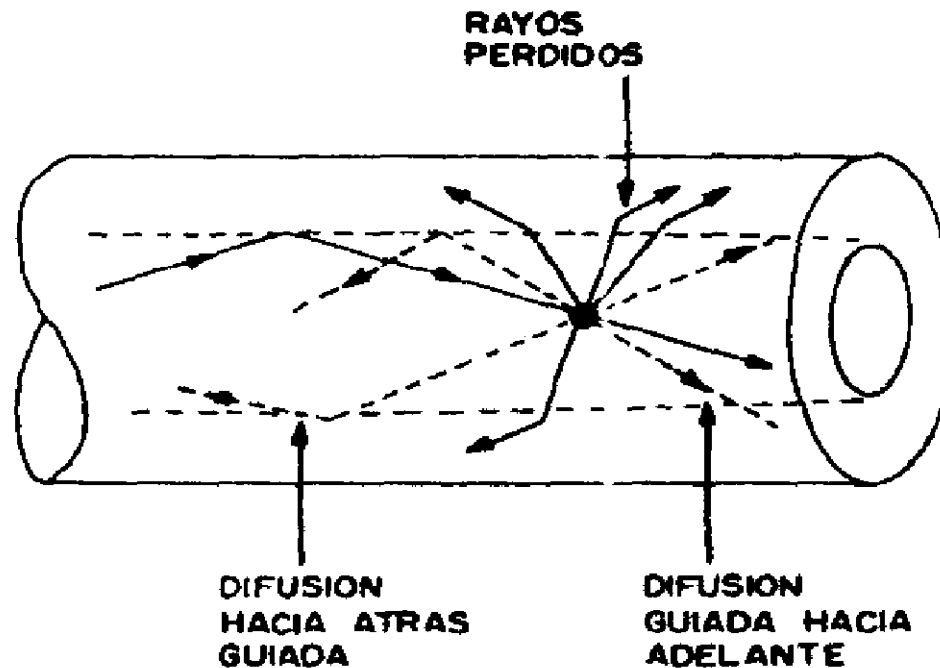


# Difusión de Rayleigh

Debido a fluctuaciones microscópicas de densidad de moléculas producidas durante la fabricación

$$\alpha_R = C/\lambda^4$$

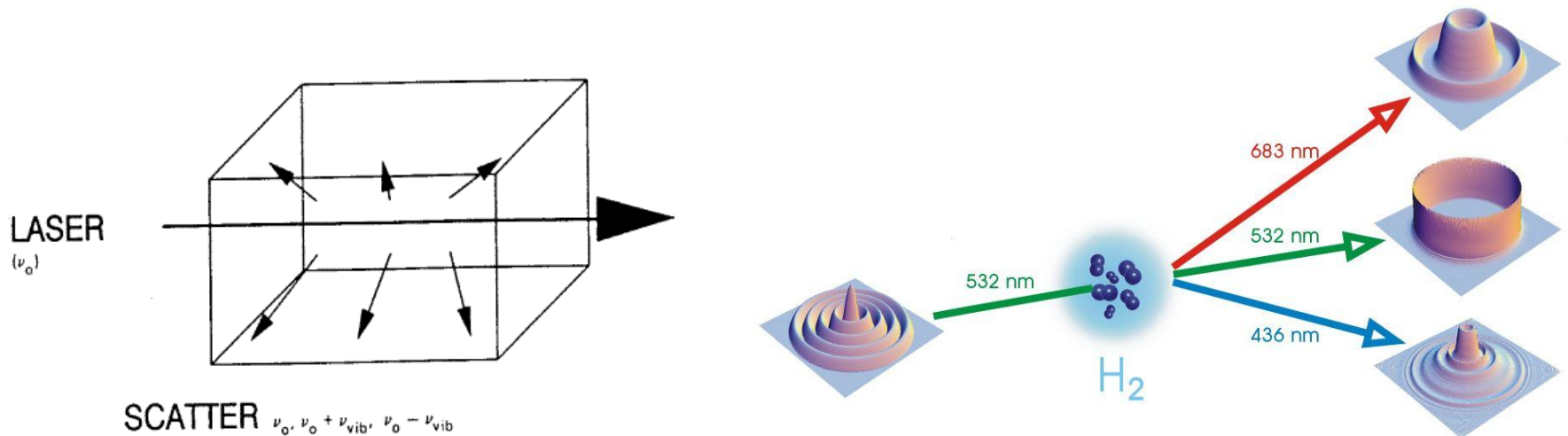
Para  $\lambda = 1550$  nm es el factor dominante ( $\alpha_R = 0.12$  a  $0.16$  dB/km)



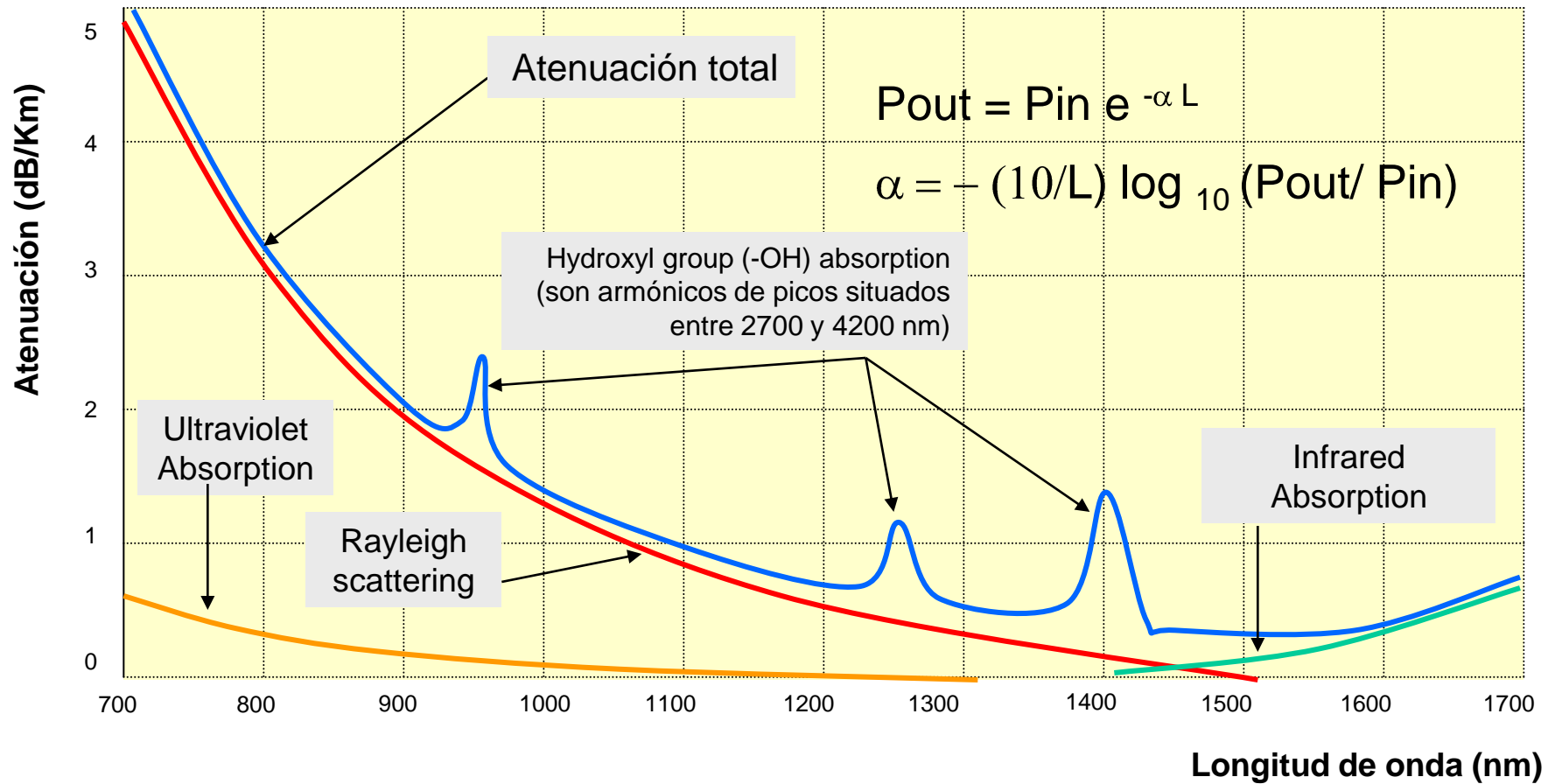
# Otras Difusiones

Modos guiados: variaciones del radio y curvaturas generan interacción de potencia entre modos guiados.

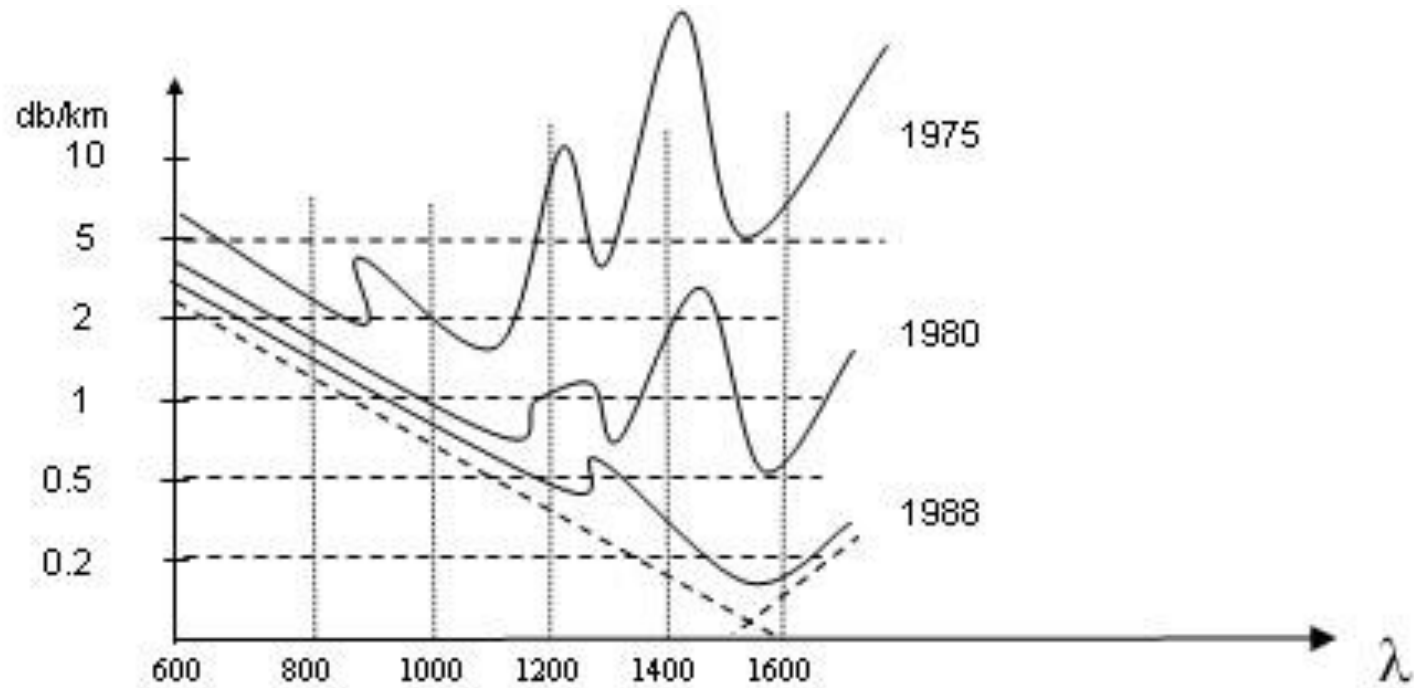
Raman y Brillouin: Generan efectos no lineales que limitan la potencia máxima que se puede inyectar en la fibra.



# Atenuación



# Atenuación



# Dispersión

- ❑ Un pulso de luz contiene un rango de longitudes de onda.
- ❑ Un medio dispersivo es aquel que presenta una distinta velocidad a cada longitud de onda.
- ❑ Esta dispersión provoca ensanchamientos temporales en el pulso.
- ❑ El efecto de la dispersión es acumulativo con la distancia.
- ❑ La dispersión en la FO se mide en ps/nm.km

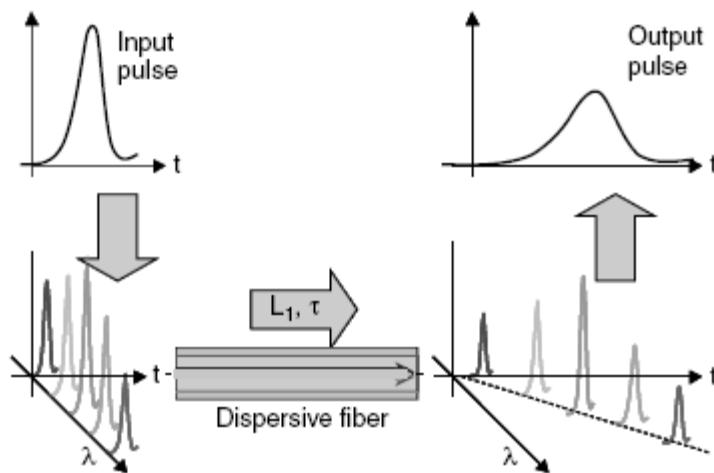
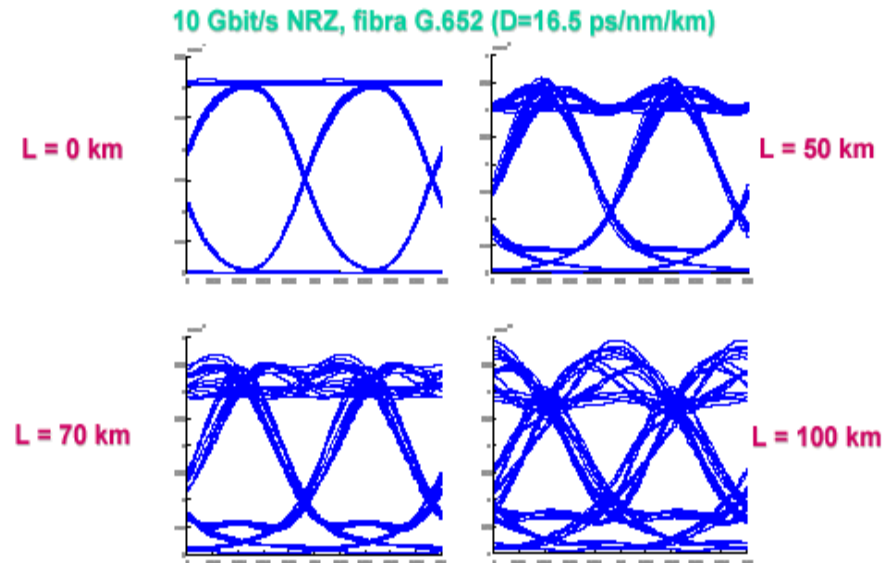


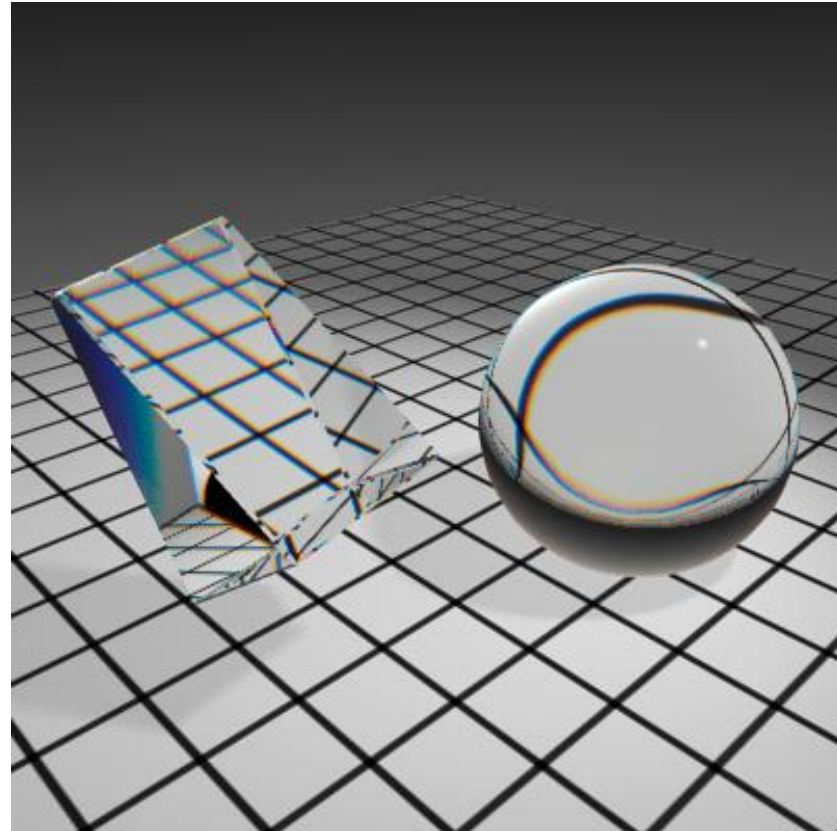
Figure 2.13. Fundamentals of chromatic dispersion.



Las componentes de alta frecuencia del pulso óptico se propagan más rápido que las componentes de baja frecuencia

# Dispersión

- ❑ La dispersión define la capacidad máxima de información que se puede transmitir por unidad de longitud [MHz.Km].
- ❑ Este fenómeno se debe a dos factores principalmente:
  - ❑ Dispersión modal ( $\sigma_M$ )
  - ❑ Dispersión cromática ( $\sigma_{CR}$ )
- ❑ La dispersión cromática tiene dos componentes:
  - ❑ Dispersión del material ( $\sigma_{MAT}$ ).
  - ❑ Dispersión Guia de Onda ( $\sigma_{GO}$ ).



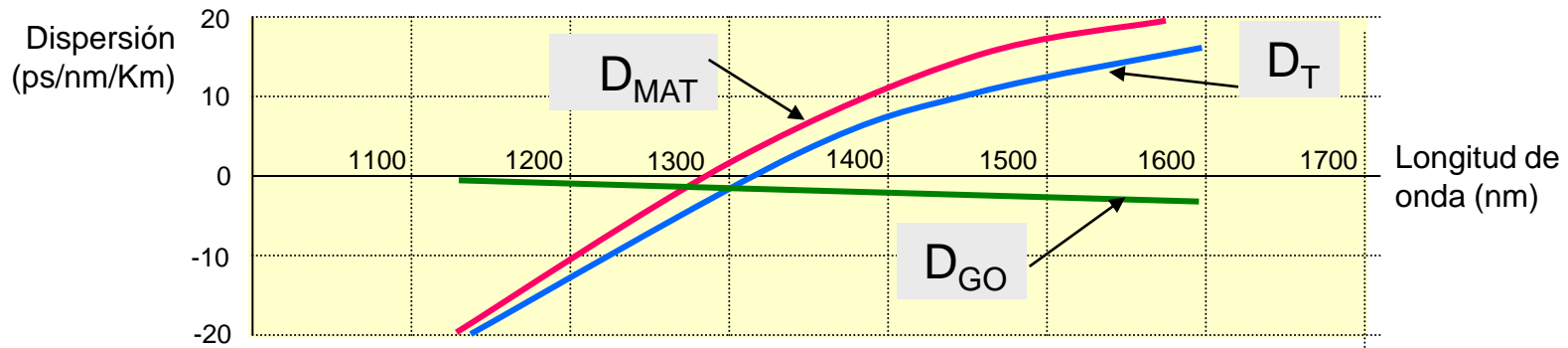
# Dispersión

$$\sigma_T^2 = \sigma_M^2 + \sigma_{CR}^2$$

- ❑ Fuente no monocromática
- ❑ Cada componente espectral sufre un retardo distinto
- ❑  $n$  no es constante con la longitud de onda
- ❑  $V_g$  depende de la frecuencia
- ❑ Componentes espectrales se dispersan y llegan desincronizadas

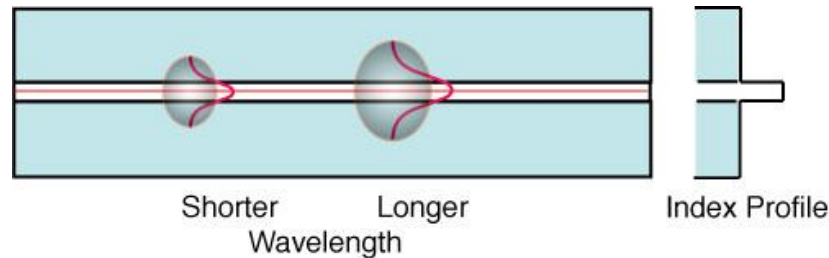
- ❑ Cada modo tiene su propia velocidad → desfasados en tiempo
- ❑ En fibras multimodo los rayos viajan en diferentes trayectorias.
- ❑ Fibras índice gradual disminuyen esta dispersión.
- ❑ Fibras monomodo no la presentan.

# Dispersión



$$\sigma_{CR}^2 = \sigma_{MAT}^2 + \sigma_{GO}^2 \xrightarrow{\text{Monomodo}} \sigma_T = \sigma_{CR}$$

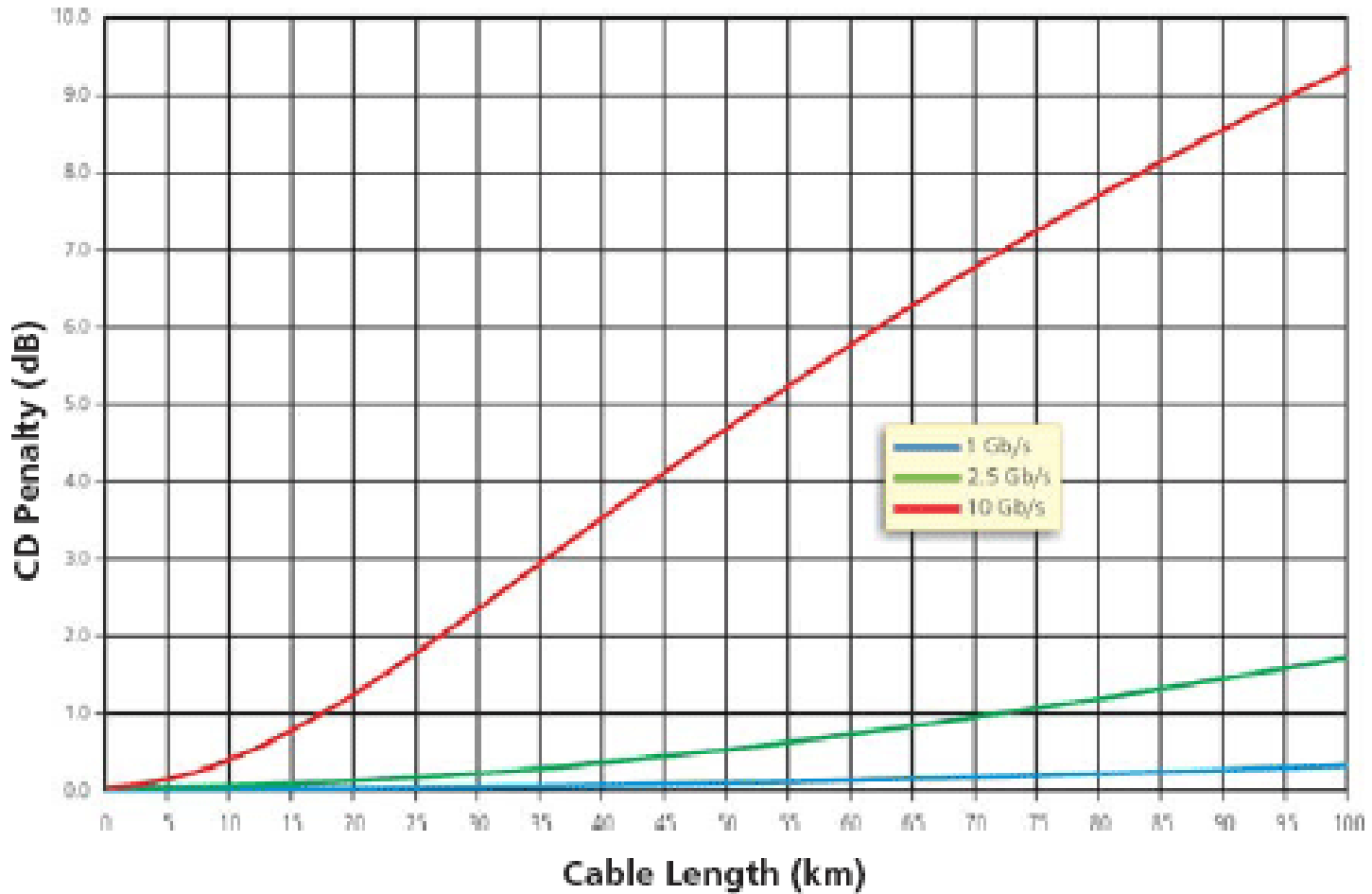
❑ La propagación depende del tamaño y forma del núcleo de la fibra. A mayores longitudes de onda, mas energía se propaga por el cladding → mayor dispersión



❑ El índice de refracción es distinto cada longitud de onda (variación no lineal)

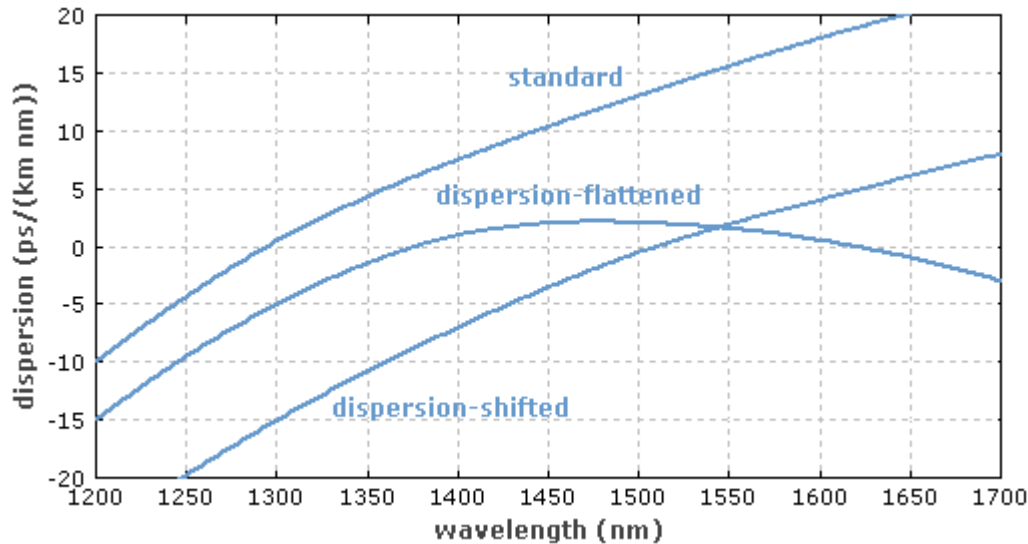


# Dispersión



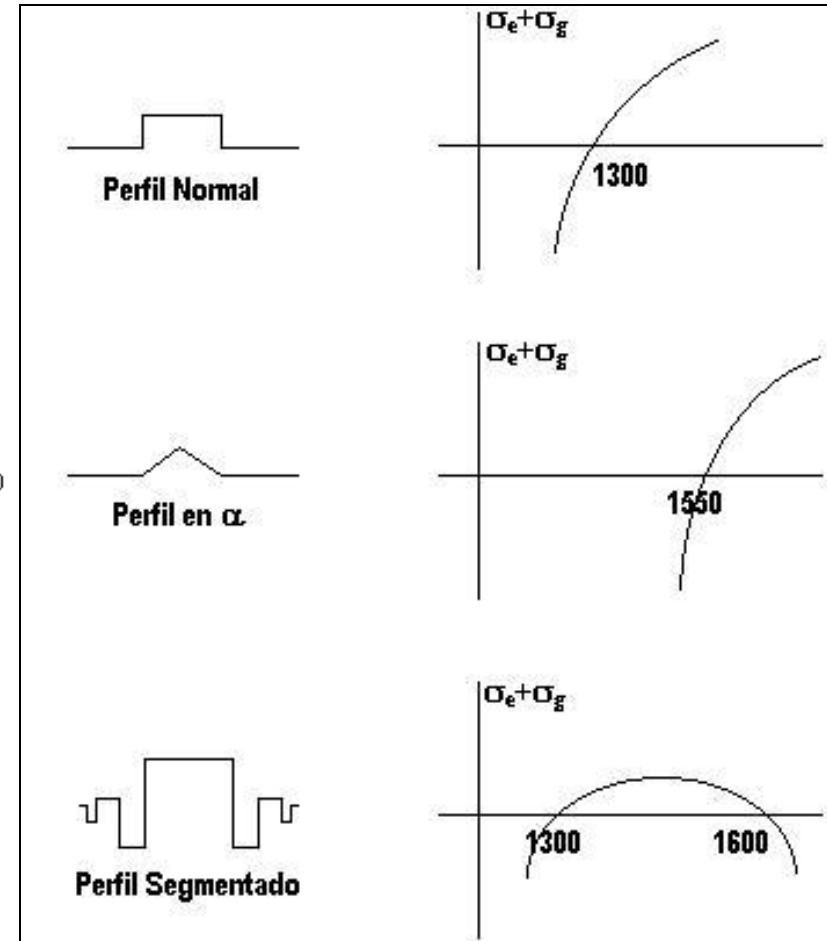
**Figure 1. Approximate CD Penalty for SMF at 1-, 2.5-, and 10-Gb/s Data Rates**

# Dispersión



❑ **Dispersión desplazada:** Alterando el perfil del índice del núcleo se logra desplazar el punto de mínima dispersión hacia el de mínima atenuación.

❑ **Dispersión aplanada:** Diseñando la fibra de modo que su curva de dispersión sea lo más plana posible y casi nula en la región de mínima atenuación.



# Compensadores de Dispersión

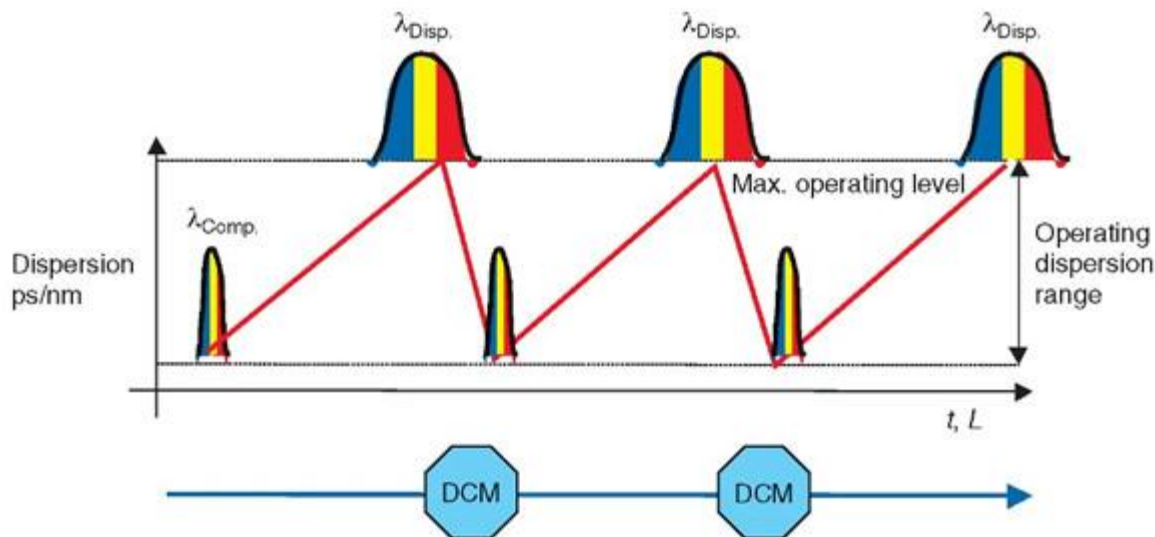
Las técnicas de compensación de dispersión deberán disminuir la diferencia en las velocidades de propagación y así conseguir mayor capacidad de transmisión del sistema óptico.

La mas usada es fibra DCF (Dispersion Compensating Fiber), capaz de compensar el GVD sobre el ancho de banda completo de la señal.

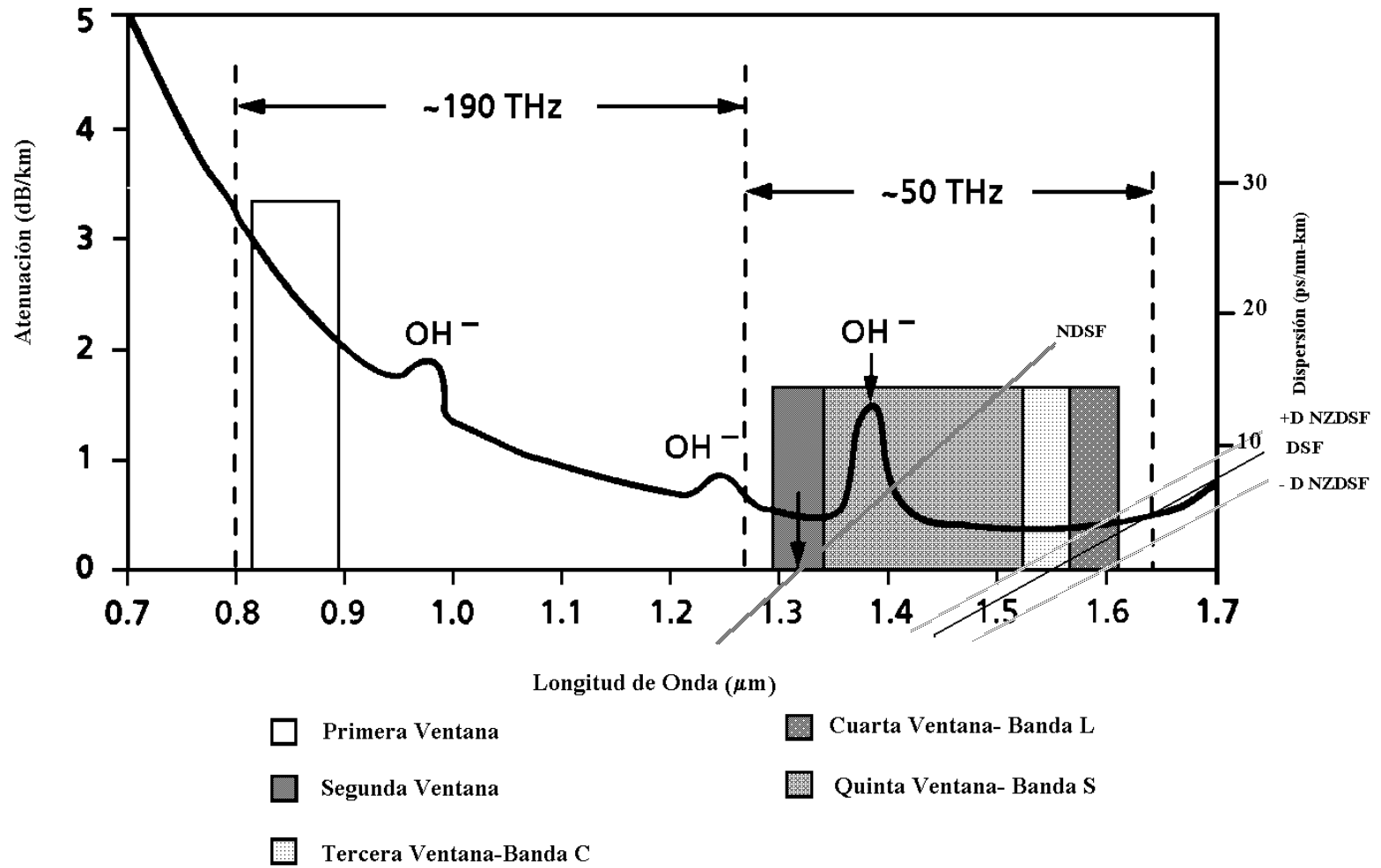
Consiste en fibras construidas con altos valores negativos de pendientes de dispersión.

La figura de merito se mide en ps/nm-dB, siendo  $\alpha_{DCF}$  las pérdidas introducidas por el DCF

$$FOM = -(D_{SMF} / \alpha_{DCF})$$

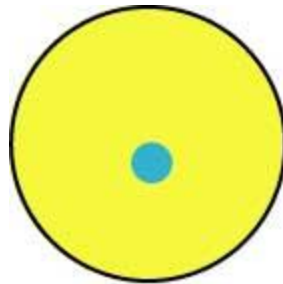
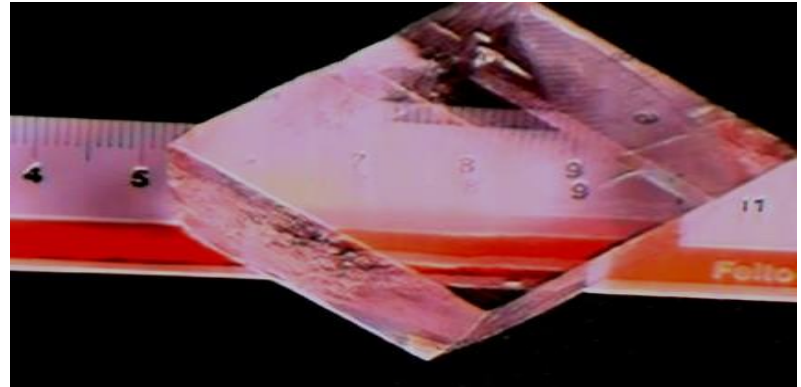


# Atenuación + Dispersión

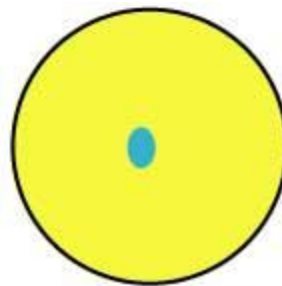


# PMD

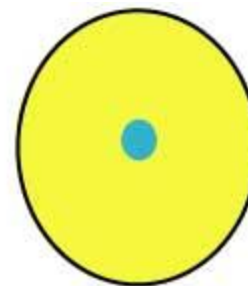
- ❑ Dispersión debido a la pérdida de simetría circular del núcleo, el índice de refracción del material del núcleo de la fibra varía continuamente entre un valor máximo y un mínimo.
- ❑ La diferencia entre el valor máximo y el mínimo es llamada *birrefringencia* (doble refracción).
- ❑ Cuando un pulso de luz se introduce en la fibra, se divide en dos pulsos polarizados u orientados ortogonalmente. Ante estos diferentes índices de refracción, cada uno de los modos de polarización se propaga con velocidades de grupo ligeramente diferentes, lo cual produce un ensanchamiento del pulso (PMD).



Concentricity

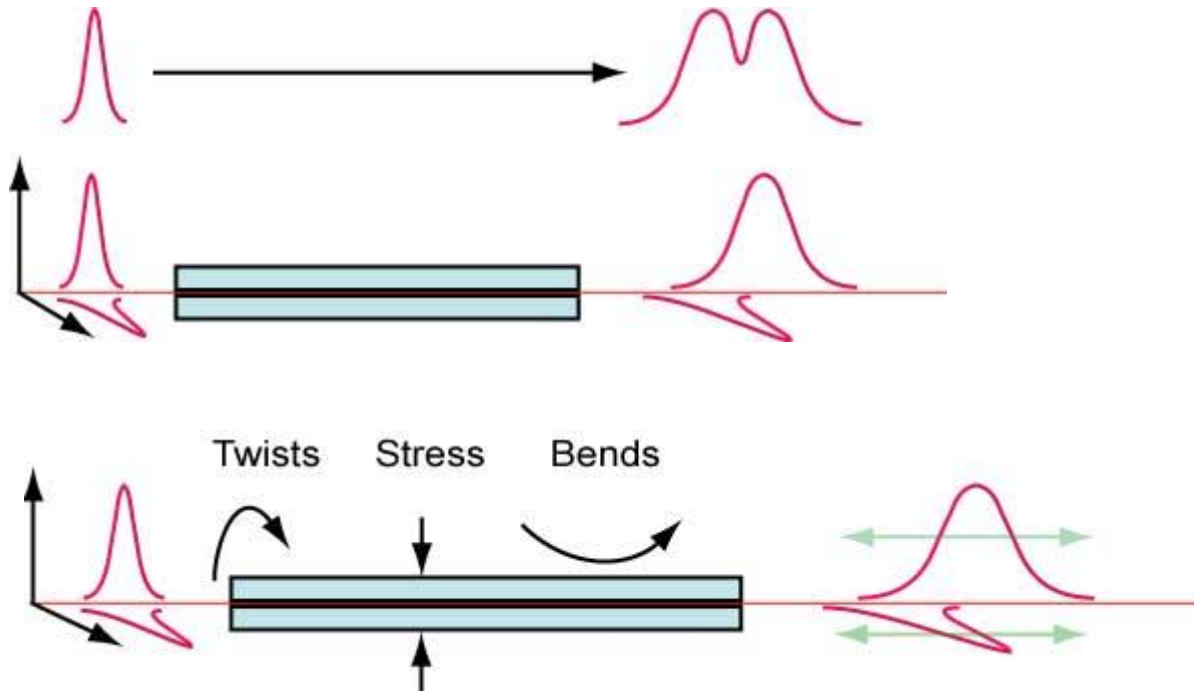


Oval Core



Oval Fiber

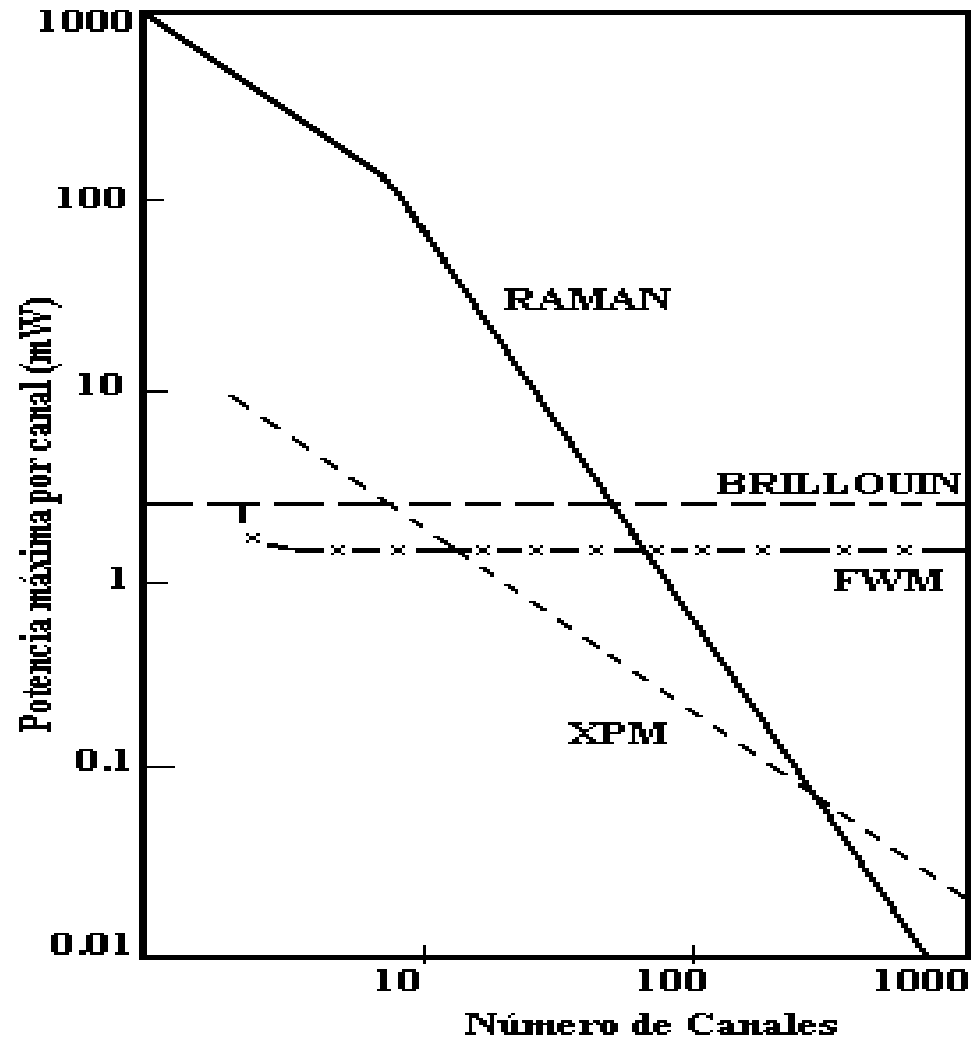
# PMD



$$\Delta\tau_{PMD} = D_{PMD}\sqrt{L} < 0.1T$$

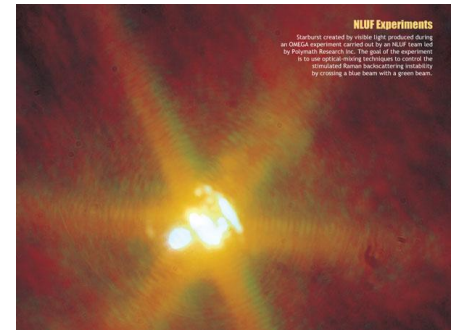
Valores típicos  $D_{PMD} = 0.2 - 0.5 \text{ ps/Km}^{1/2}$

# Efectos No lineales



# Efectos No lineales

## Dispersión Estimulada Brillouin (SBS)



El fotón incidente sobre un átomo origina un fonón acústico y un fotón dispersado de menor energía (mayor  $\lambda$ ).

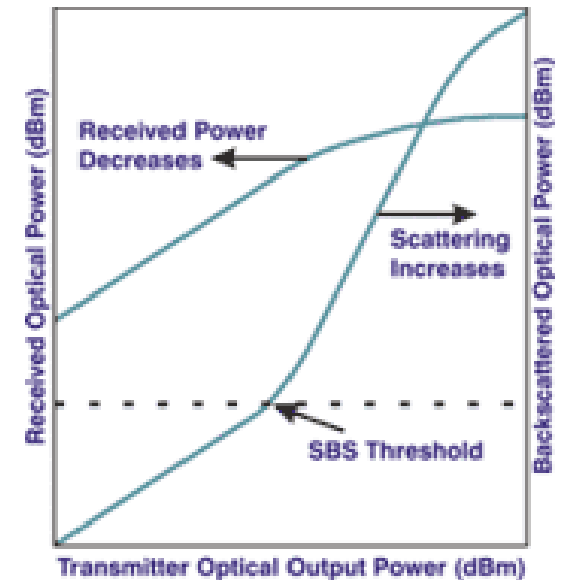
Macroscópicamente, la onda monocromática progresiva modulada en amplitud pierde potencia pues una buena parte de la misma se transfiere a una onda regresiva, debilitando la señal transmitida.

El efecto requiere que se supere cierto umbral (7 a 10 dBm) dado por la siguiente fórmula:

$$P_B = 4.4 \times 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} \nu$$

$P_B =$	Umbral de potencia (W)
$d =$	diámetro del núcleo ( $\mu\text{m}$ )
$\lambda =$	Long. de onda ( $\mu\text{m}$ )
$\alpha_{dB} =$	atenuación (dB/Km)
$\nu =$	frec. de modulación del laser (GHz)

SBS tiene el menor umbral de todos los efectos no-lineales. Se puede compensar bajando la pot./canal ó reduciendo L entre EDFA's.





# Efectos No lineales

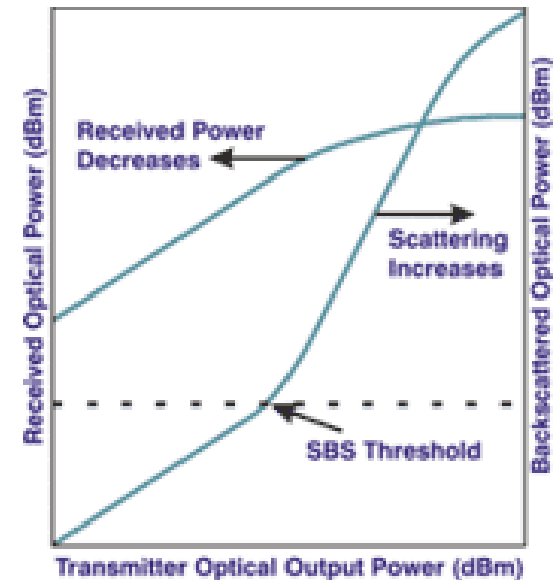
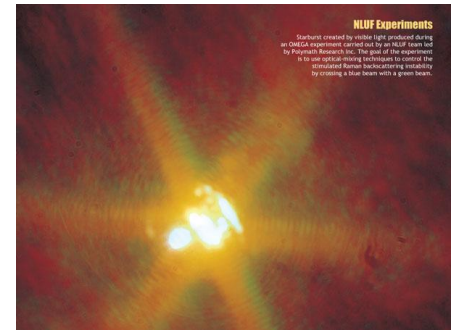
## Dispersión Estimulada Raman (SRS)

Es similar al SBS, pero en este caso, el umbral es muy superior al de SBS (del orden del Watt, 3 órdenes de magnitud) y se calcula por:

$$P_R = 5.9 \times 10^{-2} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB}$$

$P_R$  = Umbral de potencia (W)  
 $d$  = diámetro del núcleo ( $\mu\text{m}$ )  
 $\lambda$  = Long. de onda ( $\mu\text{m}$ )  
 $\alpha_{dB}$  = atenuación (dB/Km)

Solución: mantener el espaciamiento de canales lo más juntos posible ó reducir pot. por debajo de  $P_R$

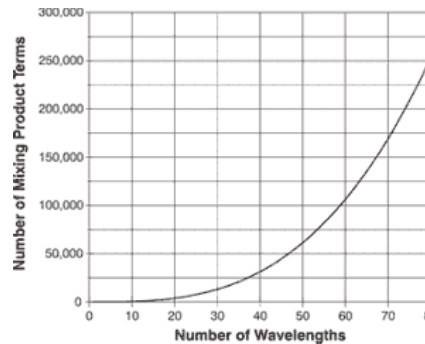
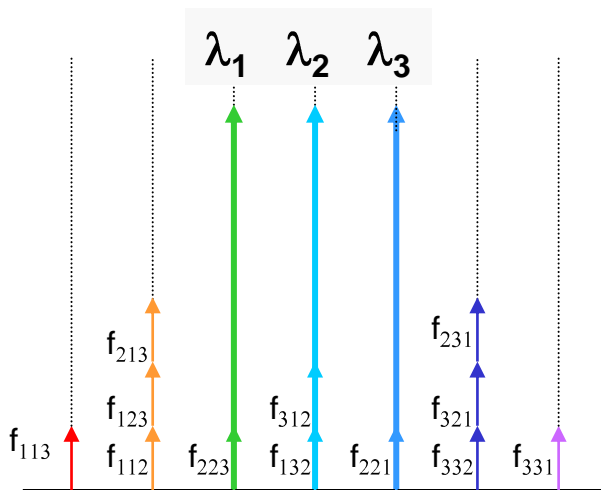


# Efectos No lineales

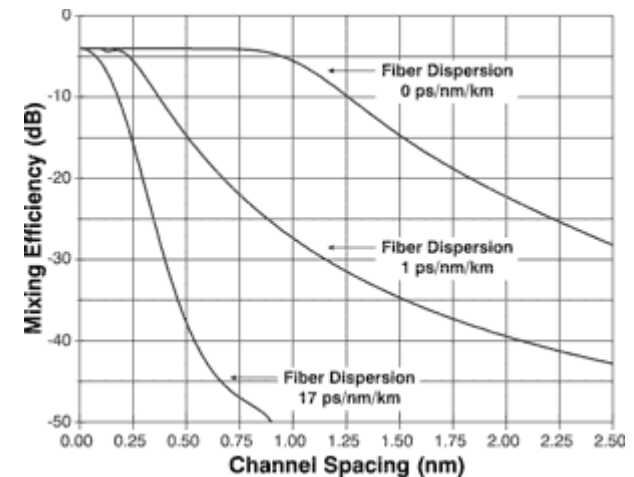
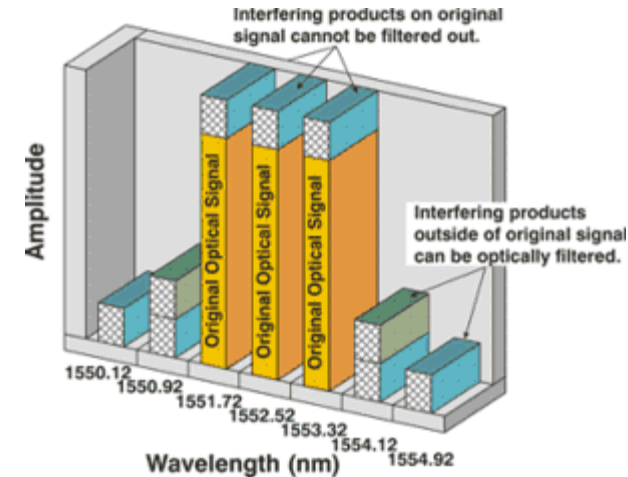
## Four Wave Mixing

► La mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing, FWM) ocurre cuando dos longitudes de onda, operando en frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  respectivamente, se mezclan para producir señales en las frecuencias  $2f_1 - f_2$  y  $2f_2 - f_1$ .

► De igual manera, la mezcla puede ocurrir por combinación de tres o más longitudes de onda. El decrecimiento en el espaciamiento entre canales y el decrecimiento de la dispersión en la fibra hace que se incremente el efecto FWM.



The number of interfering products rapidly becomes a very large number. Since there is no way to eliminate products that fall on top of the original signals, the only hope is to prevent them from forming in the first place.



# Efectos No lineales

## Self Phase Modulation (SPM)

El índice de refracción de la fibra depende de la intensidad del pulso transmitido (efecto Kerr).

$$\eta = \eta_0 + \eta_2 \cdot I$$

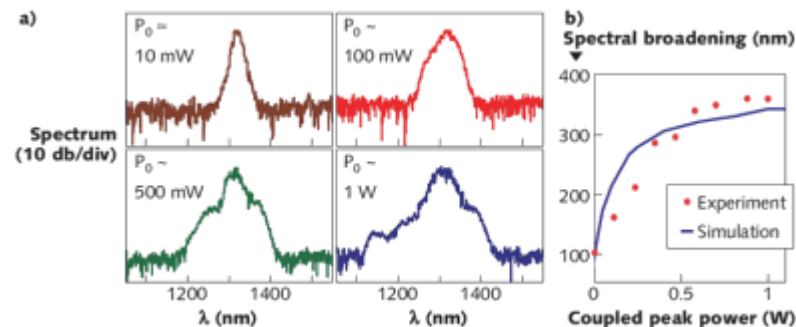
Cuando la señal varía su intensidad (al modular en amplitud al laser), se produce una modulación en fase que implica un ensanchamiento del espectro de la señal emitida. Este ensanchamiento hace a la señal más sensible a la CD.

Puede emplearse para compensar parcialmente los efectos de la dispersión cromática positiva.

# Efectos No lineales

## Modulación por fase cruzada (XPM)

- ▶ Es un efecto similar a la SPM pero se produce cuando una señal modula en fase a otra señal. Se produce en sistemas WDM.
- ▶ Además, es un efecto que depende fuertemente del tipo de fibra óptica empleada.
- ▶ Produce un desplazamiento en la fase de la señal transmitida en una determinada longitud de onda, causado por el cambio en la intensidad de una señal que se propaga en una longitud de onda diferente.
- ▶ XPM puede generar asimetrías en el pulso óptico y, combinada con la dispersión del material, puede afectar la forma del pulso en el dominio del tiempo.



A particularly intriguing demonstration last year showed that cross-phase modulation in a Si nanowire could convert signals from one standard telecommunications format to another. The input was a 10 Gbit/s non-return-to-zero (NRZ) signal with on-off keying, which was passed through a purely passive 5 mm nanowire and detuned filter to generate an RZ code with the same on-off keying and polarity preserved.<sup>7</sup> That's an important practical problem, because less expensive NRZ equipment is widely used for relatively short transmission distances in metropolitan networks, but more costly RZ equipment is used to meet higher performance requirements in long-haul networks.

# Efectos No lineales

Los efectos no lineales de dispersión dependen de la densidad de potencia



determinan la potencia y cantidad máxima de canales a transportar

- ▶ El mayor efecto de las no linealidades se produce en lambdas ubicadas en la región de cero dispersión o de baja dispersión → Incremento de la tasa de error (BER)

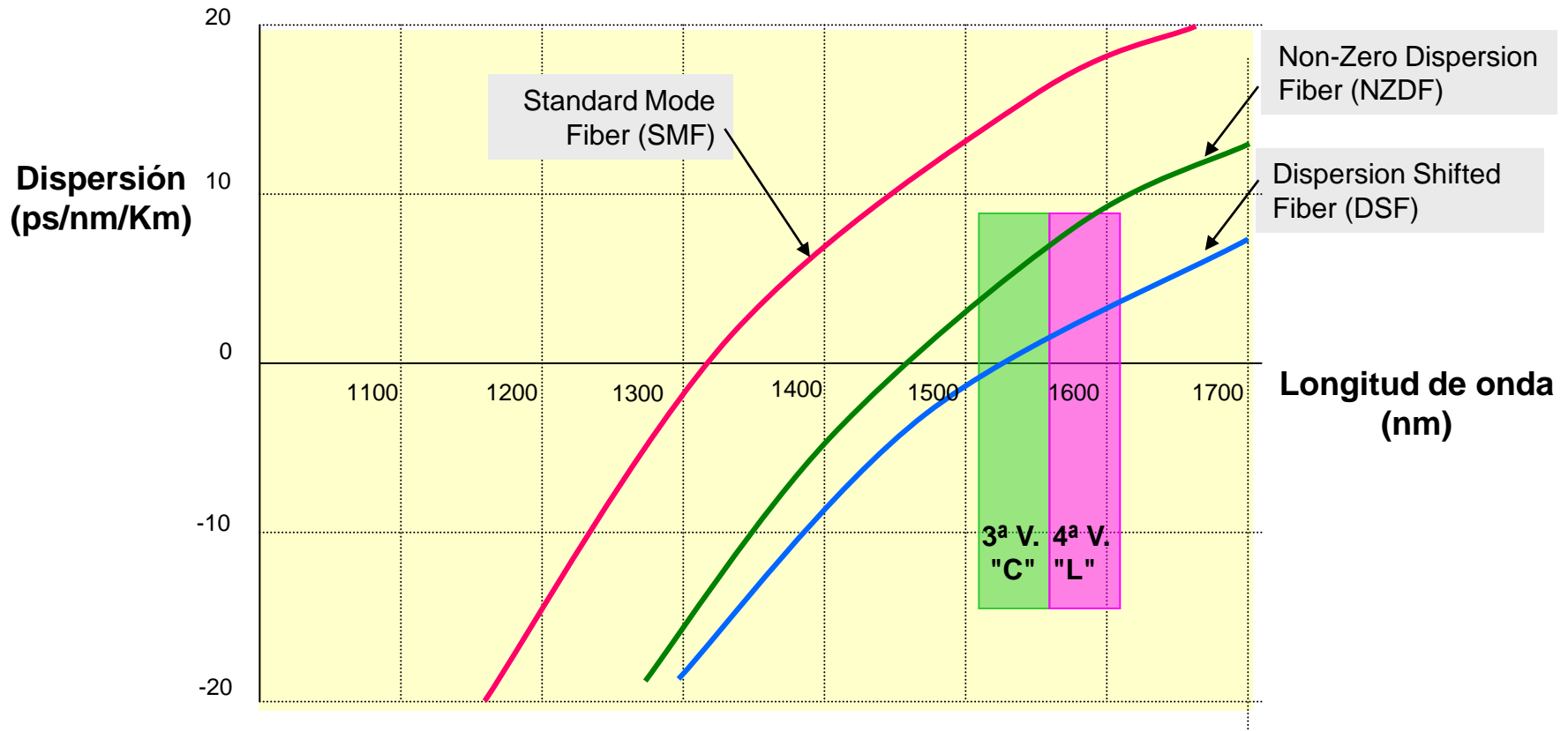
## **Estrategias para minimizar los efectos no lineales**

- ▶ Evitar la región de cero dispersión y colocar todos los canales a un lado de la región de cero dispersión, no ambos lados.
- ▶ Emplear ubicación de canal desigual (UCS) para prevenir que las nuevas frecuencias generadas a través del proceso FWM caigan en cualquiera de las señales lanzadas.

# Especificaciones de FO

Tipo	Clase	Att <sub>max</sub> [dB/km]	CD [ps / nm km]	Pend CD	MFD	A <sub>eff</sub> [μm <sup>2</sup> ]	n <sub>2</sub> [10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup> /W]
G.652-D	SMF	0,21	17 / 23	0,093	10,4	82	2,21
G.653	DS	0,25	2,7 / 2,7	0,085	8,1	50	2,25
G.655-D	NZDS	0,22	2 – 6 / 4 – 11	0,100	9,5	72	2,32
G.655-C/E	NZDS	0,22	5.5 – 9 / 7 – 11	0,045	8.6	55	2,31

# Especificaciones de FO



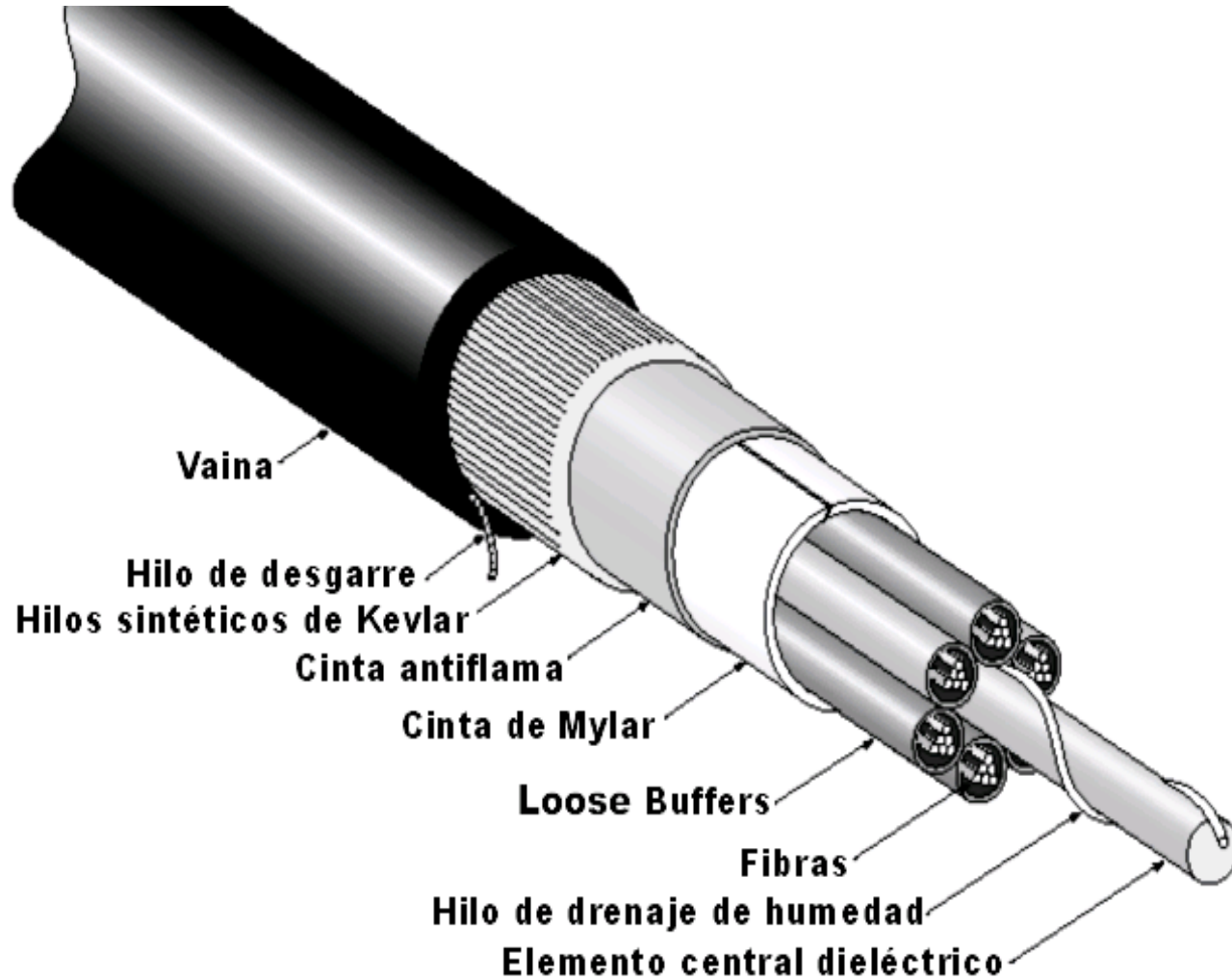
# Tipos de Cables

Los recubrimientos sobre la fibra óptica pueden ser básicamente de dos tipos:

- ▶ Recubrimiento *TIGHT* o Adherente
- ▶ Recubrimiento *LOOSE* o No Adherente



# Conformación del cable



# Cálculo de Enlace

